

Методика построения пространственного распределения концентрации каталогизированных объектов

Физический смысл концентрации – число объектов в единице объема (1/км³)
Применяется детерминированный подход. Наиболее простой способ расчета высотно-широтного распределения КО размером более 10 - 30 см каталогизированных) основан на использовании данных каталога и соответствующей модели движения. Естественно, что этот путь возможен только при наличии полного каталога, который в форме TLE можно скачать в Интернете по адресу <http://www.space-track.org>.

Данный способ включает выполнение следующих основных операций:

- а) Скачивание данных каталога КО из интернета и сохранение их в файле "TLE_cat.txt";
- б) Последовательное считывание параметров орбит КО из файла;
- в) Пересчет TLE в значения высоты и широты объекта на разные моменты времени с использованием аналитической модели движения;
- г) Суммирование числа случаев попадания объекта двумерные "ящики" разбиения ОКП с шагом 100 км по высоте и 5 град по широте;
- д) Статистическое усреднение полученных данных о числе КО в каждом из ящиков и вычисление концентрации.

Проведение расчетов для различных моментов времени, и усреднение результатов позволяет получить достаточно устойчивые оценки.

Параметры алгоритма:

Минимальная высота – 200 км.

Максимальная высота – 2000 км.

Число прогнозов для каждого из наборов TLE -100.

Фрагмент данных каталога в форме TLE (пример):

```
1 00005U 58002B 09077.87311246 .00000120 00000-0 12737-3 0 4211
2 00005 034.2562 275.8153 1850740 237.0392 103.8719 10.83996109759300
1 00011U 59001A 09079.04576453 .00000233 00000-0 11691-3 0 6947
2 00011 032.8671 320.3091 1483276 158.6056 208.3735 11.82483272129672
1 00012U 59001B 09078.89496355 .00000283 00000-0 16897-3 0 4612
2 00012 032.8952 290.3006 1680143 128.8394 247.4501 11.41219566 52468
.....
.....
1 34607U 98067BP 09079.09171105 .00776147 00000-0 52516-2 0 27
2 34607 051.6415 043.4237 0011670 135.4958 309.6759 15.72155431 22
1 34608U 98067BQ 09079.21946907 .00751243 00000-0 50025-2 0 25
2 34608 051.6390 042.7636 0012138 131.3654 317.6993 15.72598773 49
```

Каталог TLE содержит следующую информацию о КО:

```
1 AAAAAU 00 0 0 BBBB.BBBBBBBB .CCCCCCC 00000-0 00000-0 0 DDDZ
2 AAAAA EEE.EEEE FFF.FFFF GGGGGG HHH.HHHH III.IIII JJ.JJJJJJJKKKKKZ
```

Структура TLE формата:

Первая линия:

- A — регистрационный номер спутника (U и 0 не используются);
- B — эпоха данных параметров (год, день года, десятичная часть суток);
- C — скорость изменения среднего количества движения;
- D — порядковый номер измерения параметров;
- Z — контрольная сумма первой линии.

Вторая линия:

- A — регистрационный номер спутника;
- E — наклонение;
- F — прямое восхождение восходящего узла;
- G — эксцентриситет;
- H — аргумент перигея;
- 1 — средняя аномалия;
- J — среднее движение;
- K — номер витка;
- Z — контрольная сумма второй линии.

Пересчет параметров орбиты объекта в вектор скорости и координат осуществляется с помощью программного модуля SGP4, который включает в себя ряд процедур:

- определение констант;
- инициализацию переменных;
- вековые возмущения;
- долгопериодические возмущения;
- расчет аргумента широты;
- короткопериодические возмущения;
- расчет направляющих косинусов;
- расчет векторов скорости и координат.

Значение вектора координат позволяет вычислить высоту и широту КО, поместить его в свой “ящик”, и повторить эту процедуру для каждого каталогизированного объекта. Статистическое усреднение результатов достигается путем многократного циклического повторения описанной процедуры для случайных моментов времени. Следует отметить, что интервал времени, в котором выбирают случайные моменты, не должен быть очень большим, так как в противном случае увеличивается вероятность сгорания объектов, имеющих малые высоты перигея или большой баллистический коэффициент.

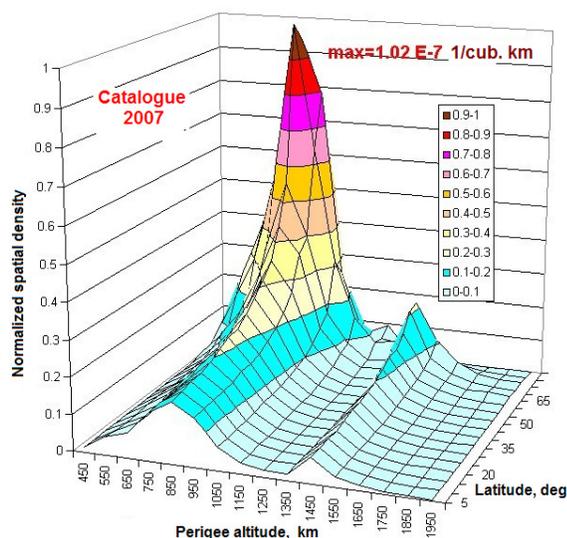


Рисунок 1. Зависимость концентрации от высоты и широты точки

Результаты работы (пример): на основе каталога TLE за октябрь 2007 г. была проведена оценка концентрации ККО на высотах от 400 до 2000 км. Общий вид полученного распределения концентрации по высоте и широте показан на рисунке 1. Четко видны два известных максимума концентрации: первый глобальный, равный $1.02 \text{ E-}7 \text{ км}^{-3}$, - на высоте 900-1000 км и широте 80-85 град и второй локальный, равный $3.57 \text{ E-}8 \text{ км}^{-3}$, на высоте 1400-1500 км и широте 70-75 град. Наблюдается резкое снижение концентрации КО в районе 90 град., что видно также из данных рисунка 2. Оценка проводилась при 1000 реализациях случайного выбора моментов времени, что обеспечило достаточный уровень усреднения.

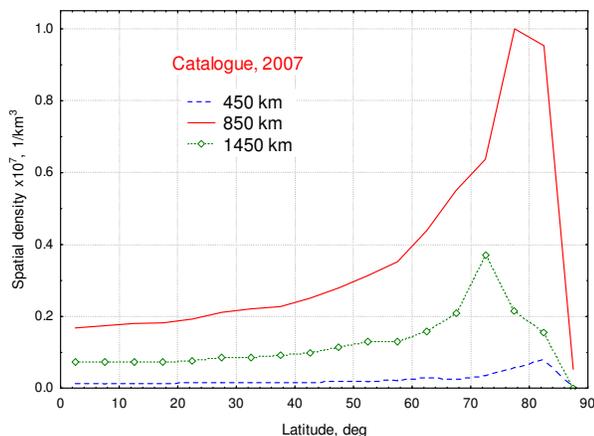


Рисунок 2. Зависимость концентрации от широты

Было выполнено исследование точности результатов от числа реализаций при случайном выборе моментов времени. Оценка погрешностей определялась как

$$\Delta = \left(\frac{1}{n} \sum_{ij} \frac{|\rho_{ij}^{(1)} - \rho_{ij}^{(2)}|}{\rho_{ij}^{(\max)}} \right) \cdot 100\%$$

Here:

$\rho_{ij}^{(1)}$ - значение концентрации КО при расчетах с заданным числом реализаций;

$\rho_{ij}^{(2)}$ - значение концентрации ККО при числе реализаций, равным 1000;

$\rho_{ij}^{(\max)}$ - абсолютное максимальное значение концентрации.

Зависимость показателя точности от числа реализаций представлена на рисунке 3.

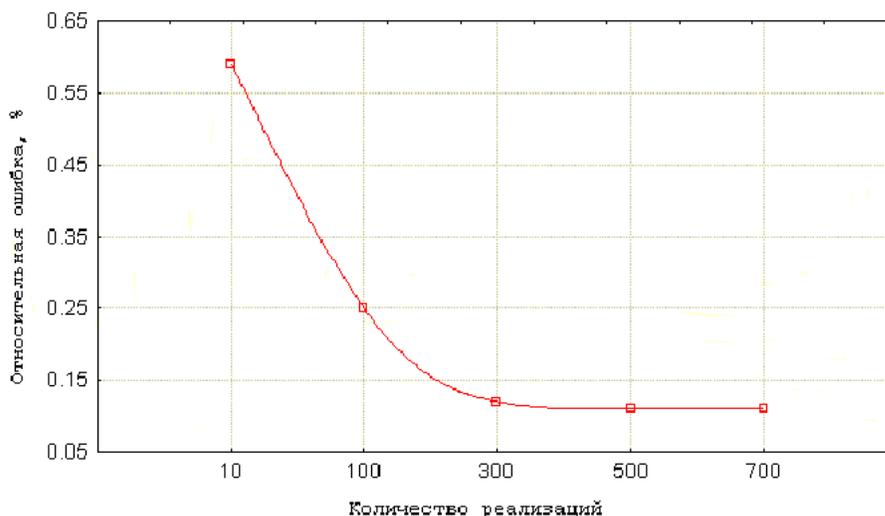


Рисунок 3. Зависимость точности от числа реализаций

При 100 реализациях среднее относительное расхождение не превышает 0.25%. Расчет концентрации КО по каталогу TLE на современном ПК занимает не более 1-2 мин. при 1000 реализаций.

Выходные данные

No	Имя файла	Комментарии
1	p_bh_cat.dat	Нормированные значения концентрации и оценка максимума концентрации
2	p_h_cat.dat	Усредненная по широте концентрация
3	n_bh.cat.dat	Среднее число объектов в «ящиках»

Пример файла “p_bh_cat.dat” file (по данным за 2007 г).

```
250 0.004 0.004 0.003 0.004 0.004 0.003 0.003 0.004 0.004 0.003 0.004 0.004 0.005 0.004 0.004 0.005 0.006 0.000
350 0.014 0.012 0.013 0.013 0.014 0.014 0.015 0.018 0.018 0.020 0.021 0.022 0.034 0.015 0.018 0.020 0.022 0.000
450 0.025 0.025 0.024 0.025 0.026 0.028 0.027 0.026 0.028 0.031 0.031 0.039 0.051 0.045 0.061 0.077 0.111 0.005
550 0.058 0.051 0.049 0.054 0.058 0.061 0.059 0.059 0.060 0.066 0.075 0.089 0.116 0.126 0.172 0.219 0.291 0.015
650 0.088 0.087 0.090 0.094 0.099 0.104 0.104 0.101 0.111 0.131 0.140 0.164 0.199 0.242 0.338 0.377 0.463 0.038
750 0.166 0.168 0.176 0.181 0.187 0.195 0.199 0.206 0.230 0.237 0.259 0.303 0.370 0.472 0.663 0.632 0.731 0.340
850 0.191 0.187 0.193 0.192 0.203 0.213 0.224 0.240 0.260 0.280 0.316 0.371 0.452 0.585 0.702 0.998 1.000 0.147
950 0.130 0.130 0.134 0.138 0.146 0.154 0.157 0.166 0.176 0.197 0.227 0.262 0.362 0.362 0.405 0.624 0.747 0.060
```

```

1050 0.065 0.064 0.065 0.069 0.069 0.075 0.077 0.078 0.083 0.093 0.101 0.118 0.151 0.171 0.197 0.307 0.260 0.158
1150 0.033 0.030 0.030 0.032 0.035 0.037 0.035 0.038 0.042 0.047 0.049 0.060 0.075 0.086 0.098 0.143 0.099 0.057
1250 0.021 0.019 0.020 0.021 0.021 0.023 0.022 0.022 0.025 0.029 0.031 0.034 0.044 0.050 0.064 0.093 0.080 0.074
1350 0.020 0.021 0.019 0.020 0.022 0.023 0.022 0.024 0.026 0.030 0.036 0.041 0.052 0.057 0.080 0.095 0.075 0.049
1450 0.066 0.068 0.070 0.072 0.075 0.079 0.079 0.088 0.094 0.108 0.124 0.122 0.148 0.195 0.339 0.196 0.154 0.004
1550 0.028 0.028 0.028 0.027 0.030 0.031 0.031 0.035 0.035 0.040 0.046 0.052 0.061 0.072 0.119 0.102 0.019 0.000
1650 0.013 0.014 0.014 0.014 0.015 0.016 0.016 0.017 0.020 0.021 0.024 0.027 0.035 0.035 0.056 0.046 0.030 0.001
1750 0.007 0.007 0.007 0.007 0.008 0.008 0.007 0.007 0.008 0.009 0.011 0.013 0.015 0.014 0.019 0.020 0.009 0.001
1850 0.005 0.005 0.005 0.004 0.005 0.005 0.005 0.005 0.006 0.007 0.008 0.009 0.012 0.009 0.009 0.013 0.004 0.000
1950 0.004 0.004 0.004 0.004 0.004 0.005 0.005 0.004 0.005 0.005 0.005 0.006 0.010 0.006 0.005 0.008 0.004 0.001

```

Maximum of spatial density= 1.02E-0007

Пример файла “p_h_cat.dat”

```

250 2.2E-0010
350 8.4E-0010
450 1.8E-0009
550 6.1E-0009
650 1.1E-0008
750 1.9E-0008
850 2.8E-0008
950 2.0E-0008
1050 9.4E-0009
1150 4.6E-0009
1250 2.9E-0009
1350 3.0E-0009
1450 1.1E-0008
1550 4.1E-0009
1650 2.0E-0009
1750 9.1E-0010
1850 6.3E-0010
1950 5.0E-0010

```

Пример файла “n_bh_cat.dat”

```

450 7 6 7 6 7 7 6 7 6 6 6 6 7 5 5 7 5 0 107
550 27 24 23 24 25 25 23 21 21 19 20 20 23 20 18 20 17 0 370
650 38 40 39 42 44 45 42 39 37 37 37 38 43 39 39 36 28 0 663
750 75 76 74 74 74 77 73 68 73 69 68 71 76 78 81 67 45 4 1224
850 98 101 103 101 104 109 109 105 108 110 111 110 118 123 112 126 73 1 1822
950 80 81 80 81 80 83 79 77 80 80 82 87 100 91 73 83 62 1 1380
1050 40 39 40 39 39 40 39 38 38 38 38 40 43 42 32 42 21 4 653
1150 19 19 21 20 19 21 20 20 18 20 20 20 23 22 19 21 8 2 329
1250 12 13 13 14 14 14 13 14 12 13 13 12 13 12 10 11 6 3 212
1350 12 13 13 12 14 14 13 13 14 14 14 14 15 14 15 13 5 1 224
1450 49 49 48 47 48 52 50 50 49 53 54 48 50 54 76 32 14 0 825
1550 19 20 20 20 20 21 19 19 19 20 20 20 20 20 27 16 2 0 321
1650 10 10 10 10 10 11 9 9 9 10 10 11 11 10 11 8 2 0 161
1750 5 5 4 4 5 5 4 4 5 5 5 5 5 5 5 3 1 0 76
1850 3 3 3 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 6 3 2 2 0 0 54
1950 3 3 2 3 3 3 3 3 3 2 3 3 3 4 2 1 2 0 0 43

```

В левом столбце приведены значения высоты, а в правом – суммарное среднее число объектов, находящихся в данном высотном слое.